# توسعه عملکرد فتوولتائیک سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای با به‌کارگیری فتوآند نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم: نانولوله کربنی*

شروین دانشور اصل[۱] سید خطیب‌الاسلام صدرنژاد[۲]


## چکیده

*پو شش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اک سید تیتانیم- نانولوله کربنی چنددیواره ($TiO_2$-MWCNT) حاوی در صدهای گوناگون از نانولوله کربنی روی زیرلا یه اکسید قلع دوپ‌شده با فلوئور به روش سل‌ژل غوطه‌وری ایجاد شدند. سپس، سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای با استفاده از آندهای تهیه شده از این پو شش‌ها، الکترولیت اک سای شی-کاه شی پایه ید و الکترود کمکی پلاتینه شده ساخته شدند. نتایج ن شان دادند که سلول خورشیدی ساخته‌شده از فیلم نانوکامپوزیتی $TiO_2$-3%wt.MWCNT دارای بیش‌ترین بازدهی تبدیل (۵/۳۱٪) و میزان افزایش بازدهی نسبت به حالتی که از لا یه $TiO_2$ خالص در ساخت آند استفاده شود، ٪۶۹ ~ است. این ارتقا در بازدهی تبدیل به افزایش رسانایی الکتریکی آند، کاهش ترکیب مجدد حامل‌های بار در آن و کاهش مقاومت انتقال بار در فصل مشترک دی‌اکسید تیتانیم/ رنگ‌دانه/ الکترولیت نسبت داده شد.*


**واژه‌های کلیدی** سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای، دی‌اکسید تیتانیم، نانولوله کربنی، سل‌ژل غوطه‌وری و بازدهی تبدیل

# Improvement of the Photovoltaic Performance of Dye-Sensitized Solar Cell by Using $TiO_2$:CNT Nanocomposite Photoanode

S. Daneshvar e Asl S. K. Sadrnezhaad


## Abstract

*$TiO_2$–MWCNT nanocomposite films containing various percentages of multi-wall carbon nanotubes were coated on fluorinated tin oxide (FTO) conductive glass substrates by sol–gel dip coating technique. Dye-sensitized solar cells were assembled by using anodes made of these nanocomposite films, iodide/triiodide redox couple electrolyte and platinum coated FTO cathodes. Cells having $TiO_2$–3wt.%MWCNT nanocomposite anode showed maximum solar-to-electric energy conversion efficiency of 5.31%, which was 69% higher than conventional $TiO_2$ solar cells. The enhancement of conversion efficiency was attributed to the increased electrical conductivity of the anode, decreased charge carrier recombination in the anode and decreased charge transport resistance at the $TiO_2$/dye/electrolyte interface.*


**Keywords** Dye-Sensitized Solar Cell, Titanium Dioxide, Carbon Nanotube, Sol-Gel Dip Coating and Conversion Efficiency

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۵/۱/۲۷ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۶/۳/۶ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

Email: sadrnezh@sharif.edu

**DOI: 10.22067/ma.v30i1.55134**

## مقدمه

سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای (Dye-sensitized Solar Cells, DSCs) به دلیل هزینه تولید کم، بازدهی مطلوب و فرایند ساخت ساده در مقایسه با سلول‌های خورشیدی سیلیکونی متداول، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [1-4]. در این سلول‌ها، ابتدا نور خورشید توسط مولکول‌های رنگ‌دانه جذب و الکترون‌ها از بالاترین اوربیتال‌های مولکولی پر رنگ‌دانه به پایین‌ترین اوربیتال‌های مولکولی خالی آن تهییج می‌شوند. سپس، الکترون‌های تهییج‌شده به سرعت به نوار هدایت نانوذرات اکسیدی تزریق می‌شوند. این الکترون‌ها از طریق شبکه نانوذرات به زیرلایه رسانای شفاف رسیده و توسط آن جمع‌آوری می‌شوند. مولکول‌های رنگ‌دانه اکسیدشده توسط احیای گونه‌های موجود در الکترولیت از جمله $I^-$ مجددا تولید می‌شوند و یون‌های $I^{3-}$ حاصله از الکترود کمکی الکترون می‌گیرند تا مدار جریان در سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای کامل شود [5,6]. معمولاً نانوذرات دی‌اکسید تیتانیم به علت بازدهی بالاتر حاصل نسبت به سایر نیمه‌رساناهای اکسیدی به عنوان الکترود کاری در سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای استفاده می‌شوند [1]. از جمله برتری‌های دی‌اکسید تیتانیم می‌توان به مقاومت به خوردگی نوری، پایداری شیمیایی/ حرارتی، خنثی‌بودن از نظر شیمیایی، مقاومت به خوردگی، فعالیت فتوکاتالیستی زیاد، غیرسمی‌بودن و فراوانی (قیمت کم) اشاره کرد [7]. برای افزایش بازدهی سلول‌های خورشیدی پایه دی‌اکسید تیتانیم باید از ترکیب مجدد حامل‌های بار تولیدشده در اثر تابش نور جلوگیری کرد. رویکردهای موجود شامل ارتقای انتقال الکترون در لایه الکترود و مسدودکردن ترازهای فصل مشترکی زیر لبه نوار هدایت این نیمه‌رسانا هستند. انتقال الکترون در الکترود پایه دی‌اکسید تیتانیم از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار روی بازدهی تبدیل سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای است. تحرک بیش‌تر الکترون، بازدهی بالاتر سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای را نتیجه می‌دهد. ترازهای فصل مشترکی ترکیب مجدد الکترون‌های تزریق‌شده به نوار هدایت دی‌اکسید تیتانیم با یون‌های $I^{3-}$ موجود در الکترولیت را آسان می‌کنند [1,3,5,8].

در سال‌های اخیر، نانولوله‌های کربنی به دلیل رسانایی الکتریکی بالا، پایداری شیمیایی، مساحت سطح زیاد و ساختار لوله‌ای‌شکل بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [1,9-16]. با این وجود، گزارش‌های کمی مبنی بر استفاده از نانولوله‌های کربنی در لایه دی‌اکسید تیتانیم در سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ، علی‌رغم پتانسیل ذاتی برای افزایش بازدهی تبدیل انرژی خورشیدی ناشی از رسانایی الکتریکی مطلوب آن‌ها، وجود دارد. از تمایل بالا به الکترون در نانولوله‌های کربنی می‌توان برای جمع‌آوری الکترون‌ها و افزایش تحرک آن‌ها در سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای استفاده کرد [17,18].

در این مقاله به منظور بررسی امکان توسعه عملکرد سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای، نانوکامپوزیت‌های دی‌اکسید تیتانیم: نانولوله‌های کربنی چنددیواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی به روش سل‌ژل غوطه‌وری سنتز و به عنوان الکترود کاری در سلول خورشیدی استفاده شده‌اند. نوآوری پژوهش، به کارگیری روش سل‌ژل غوطه‌وری برای سنتز لایه‌های نانوکامپوزیتی قابل استفاده در سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای است که در مقایسه با شیوه‌های متداول از جمله روش دکتر بلید آسان‌تر، کم هزینه‌تر و از نظر زمانی کوتاه‌تر است. بازدهی سلول خورشیدی در این تحقیق از راندمان به دست‌آمده در اغلب کارهای قبلی بیش‌تر است.

## روش تحقیق

به منظور ایجاد گروه‌های عاملی روی سطح نانولوله‌های کربنی چنددیواره عملیات اکسیداسیون شیمیایی روی آن‌ها انجام شد. در یک عملیات نوعی، ۵۰۰ میلیگرم از نانولوله کربنی چنددیواره (خلوص ۹۵٪، US Research Nanomaterials) در ٦٨ میلی‌لیتر از محلول غلیظ اسید نیتریک: اسید سولفوریک (با نسبت حجمی ۳:۱) به مدت

۱۰ ساعت در حمام اولتراسونیک با دمای ٦۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. سپس، نانولوله کربنی چنددیواره با غشاء پلیمری پلی‌ترافلوئورواتیلن فیلتر و با آب دی-یونیزه چندین‌بار شسته شدند تا مقدار pH محلول حاصل از شستشو به ٦ برسد. در نهایت، نانولوله کربنی چنددیواره در خشک‌کن با دمای ٤۰ درجه سانتیگراد به مدت ٤۸ ساعت خشک شدند.

سل دی‌اکسید تیتانیم توسط هیدرولیز جزئی و چگالش تیتانیم بوتوکسید (خلوص ۹۸٪، Merck) توسط آب تهیه شد. بدین منظور، مخلوط آب دی‌یونیزه (۱/۰ میلی‌لیتر) و اتانول (۵۵/۰ میلی‌لیتر، به عنوان حلال) قطره-قطره به یک فلاسک حاوی تیتانیم بوتوکسید (٥/٦ میلی-لیتر، به عنوان پیش‌ماده تیتانیم)، اسید هیدروکلریک (٤/۰ میلی‌لیتر، به عنوان کاتالیست) و نانولوله‌های کربنی پیش-عملیات‌شده ضمن همزدن اضافه شد. محلول حاصل در دمای اتاق، تحت اتمسفر نیتروژن توسط همزن مغناطیسی به مدت ۱ ساعت همزده شد. غلظت پیشنهادی برای نانولوله‌های کربنی ۰ تا ٤ درصد وزنی سل بود. سپس، با افزایش دمای سل به ۷۰ درجه سانتیگراد اجازه داده شد تا با تبخیر حلال، سل ویسکوز حاصل شود. در مرحله بعد، زیرلایه‌های FTO در سل تیتانیا به مدت ۱۰ دقیقه غوطه‌ور شده و در جهت عمود بر سطح سل با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه خارج شدند. این زیرلایه‌ها در دمای ٤٥۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱:٤۰ در معرض اتمسفر خنثی آنیل شدند.

به منظور جذب مولکول رنگ‌دانه، زیرلایه‌های پوشش داده شده به مدت ٢٤ ساعت در محلول ٤/۰ میلی‌مول از رنگ‌دانه N719 قرار گرفتند. در نهایت، سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای با استفاده از این آندها، الکترولیت اکسایشی- کاهشی پایه ید و الکترود کمکی پلاتینه‌شده به حالت ساندویچی بسته شدند. شایان ذکر است که برای هر درصد از نانولوله کربنی چنددیواره، سه سلول ساخته شد و مورد مشخصه‌یابی قرار گرفت. نتایج گزارش‌شده میانگین مقادیر به دست‌آمده هستند.

جهت تشخیص بلورینگی، تعیین نوع و نسبت فازهای تشکیل‌شده و محاسبه اندازه بلورک‌ها در پوشش‌های نانوکامپوزیتی از دستگاه پراش‌سنجی پرتوی ایکس (X-Ray Diffraction, XRD) مدل STOE, Stadi P دارای لامپ مسی با طول موج ۱/٥٤۱۸ آنگستروم، جهت مطالعه مورفولوژی و ابعاد نانوساختارهای تشکیل‌شده و همچنین بررسی سطح پوشش‌های ایجادی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) مدل MIRA/TESCAN، به منظور بررسی مقاومت‌های داخلی و انتقالات الکترونی در سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته‌شده از طیف‌سنج امپدانس الکتروشیمیایی مدل AUTOLAB AUT 83587 و به منظور ارزیابی عملکرد فتوولتائیک، اندازه‌گیری پارامترهای فتوالکتروشیمیایی و بازده سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای در تبدیل انرژی نور خورشید به جریان الکتریکی از دستگاه شبیه‌ساز نور خورشیدی ساخت شرکت Palm.sens استفاده شد.

## نتایج و بحث

شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب الگوهای پراش‌سنجی پرتوی ایکس پوشش دی‌اکسید تیتانیم خالص تکلیس-نشده و پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم-نانولوله کربنی چنددیواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چنددیواره بعد از تکلیس را نشان می‌دهند.

از شکل (۱) مشخص است که ساختار پوشش قبل از آنیل به صورت آمورف است. در ماده آمورف تعداد زیادی مکان‌های تله وجود دارند که باعث بازترکیب شارژ تولیدی از فوتون‌های نور می‌شوند و بنابراین بلورینه‌کردن ماده اهمیت دارد [۱۹]. شکل (۲) نشان می-دهد که پوشش‌ها در حین آنیل تبلور یافته و استحاله فازی آمورف به آناتاز در آن‌ها اتفاق افتاده است. به طوری که بعد از زینتر، ساختار بلوری دی‌اکسید تیتانیم در همه پوشش‌ها تماما آناتاز شده و هیچ پیکی مبنی بر

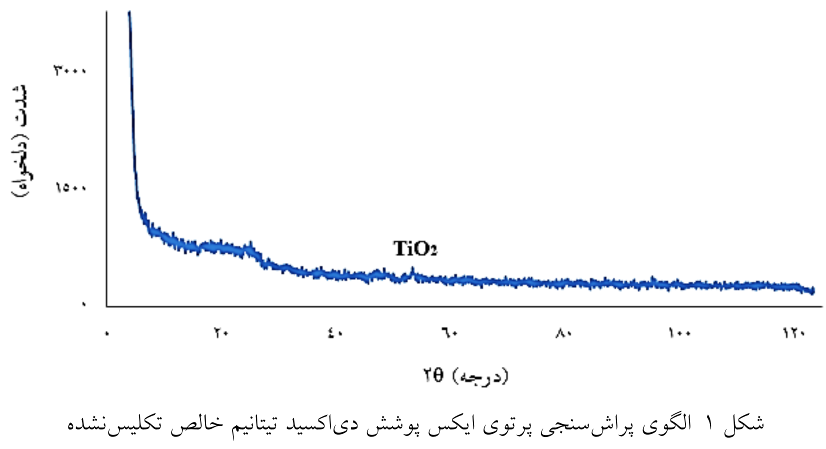
وجود فازهای روتیل، بروکایت و یا ترکیبات دیگر نظیر ناخالصی‌ها وجود ندارد. البته با توجه به این که حد تشخیص آزمون پراش‌سنجی پرتوی ایکس بالای ۵ درصد وزنی است، احتمال وجود این فازها و ترکیبات به میزان کم‌تر از این حد وجود دارد. فاز آناتاز دارای ساختار کریستالی تتراگونال بوده و ثوابت شبکه آن عبارتند از: a=b=۰/۳۷۳۳ نانومتر و c=۰/۹۳۷ نانومتر [20]. اندیس میلر صفحه‌های بلوری متناظر با پیک‌های آشکارشده فاز آناتاز به ترتیب از چپ به راست عبارت از (۱۰۱)، (۰۰٤)، (۲۰۰)، (۱۰۵)، (۲۱۱)، (۲۰٤)، (۱۱٦)، (۲۲۰)، (۲۱۵) و (۲۲٤) می‌باشند [21].

همان‌طور که در نمودارها مشخص است، پیک مشخصه نانولوله کربنی در ۲٦=θ2 درجه به دلیل هم‌پوشانی این پیک با پیک (۱۰۱) فاز آناتاز و بلورینگی غالب دی‌اکسید تیتانیم، در طیف‌های مربوط به پوشش‌های نانوکامپوزیتی مشاهده نمی‌شود. نتایج مشابهی توسط لی و همکاران [1]، یو و همکاران [2]، چاونقونگ و همکاران [3] و چانگ و همکاران [4] گزارش شده است. دلیل دیگر این امر می‌تواند اختلاف جرم زیاد نانولوله کربنی چنددیواره و دی‌اکسید تیتانیم در پوشش‌های نانوکامپوزیتی باشد.

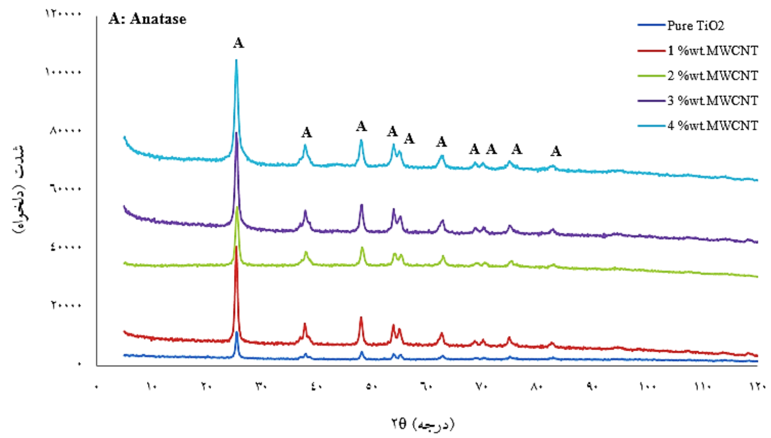
با محاسبه اندازه بلورک‌های دی‌اکسید تیتانیم توسط رابطه ویلیامسون- هال (رابطه ۱) مشخص شد که با افزایش مقدار نانولوله کربنی چنددیواره در سل، اندازه بلورک‌های فاز آناتاز کم می‌شود. به طوری که این مقدار از ۱۱ نانومتر برای پوشش دی‌اکسید تیتانیم خالص به ۵/۵ نانومتر برای پوشش نانوکامپوزیتی $TiO_2$-4%wt.MWCNT می‌رسد. دلیل این امر آن است که حضور نانولوله کربنی چنددیواره در پوشش‌های نانوکامپوزیتی مانع رشد بلورک‌های دی‌اکسید تیتانیم می‌شود [2]. مرزدانه‌های اصلی و فرعی به عنوان موقعیت‌های تله در مسیر حرکت الکترون‌ها عمل می‌کنند. بنابراین، کم‌شدن اندازه بلورک‌های دی‌اکسید تیتانیم منجر به افزایش پدیده ترکیب مجدد می‌شود و از این لحاظ مطلوب نیست. یکی از دلایل بهینه‌سازی میزان افزودن نانولوله‌های کربنی در این پژوهش، در نظرگیری این مطلب است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به این که پیک (۱۰۱) فاز آناتاز با پیک (۰۰۲) نانولوله‌های کربنی هم‌پوشانی دارد، برای محاسبه اندازه بلورک‌های دی‌اکسید تیتانیم از سه پیک شدید بعدی این ماده استفاده شده است.

$$\beta \cos\theta = \frac{0.9\,\lambda}{D} + 4\,\varepsilon \sin\theta \qquad (۱)$$

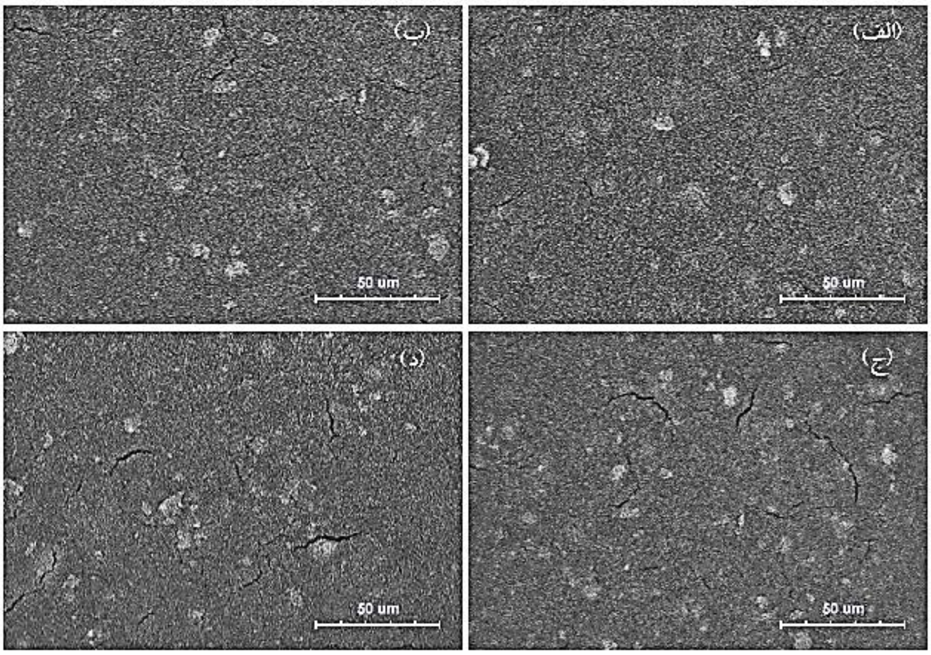
در این رابطه، β= عرض کامل در نصف بیشینه بر حسب رادیان، λ= طول موج پرتوی ایکس بر حسب نانومتر، ε= بیشینه کرنش موجود در ساختار ماده (بدون واحد)، D= متوسط اندازه بلورک‌ها بر حسب نانومتر و θ= زاویه تفرق بر حسب درجه می‌باشند [22].




شکل ۱ الگوی پراش‌سنجی پرتوی ایکس پوشش دی‌اکسید تیتانیم خالص تکلیس‌نشده




شکل ۲ الگوهای پراش‌سنجی پرتوی ایکس پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چنددیواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چنددیواره بعد از تکلیس



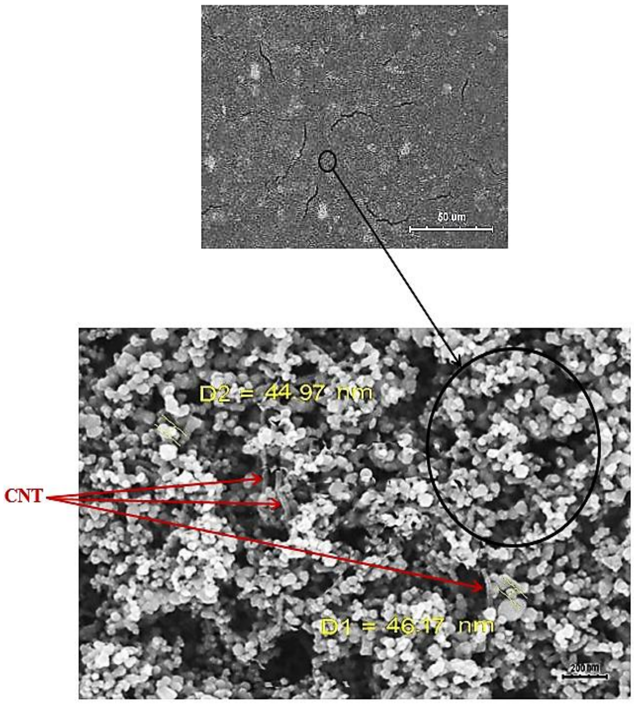

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چنددیواره حاوی: الف) ۰، ب) ۱، ج) ۲ و د) ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی چنددیواره

در شکل (۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی-اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چنددیواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چنددیواره نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار نانولوله کربنی در ساخت سل، میزان حضور ترک روی سطح پوشش‌های نانوکامپوزیتی زیاد شده است. علت افزایش این ترک‌ها، آگلومره‌شدن نانولوله‌های کربنی است [1,2,4,17]. حضور این ترک‌ها می‌تواند تعداد مکان‌های جذب رنگ‌دانه در لایه دی‌اکسید تیتانیم را کم کرده و باعث افت بازدهی سلول خورشیدی رنگ-دانه‌ای شود. در واقع، در این حالت مولکول‌های رنگ‌دانه قرارگرفته در ترک پیوندی با ذرات دی‌اکسید تیتانیم نداشته و در مرحله شستشو با اتانول هدر می‌روند و یا این که بعد از مونتاژ پیل وارد الکترولیت می‌شوند.

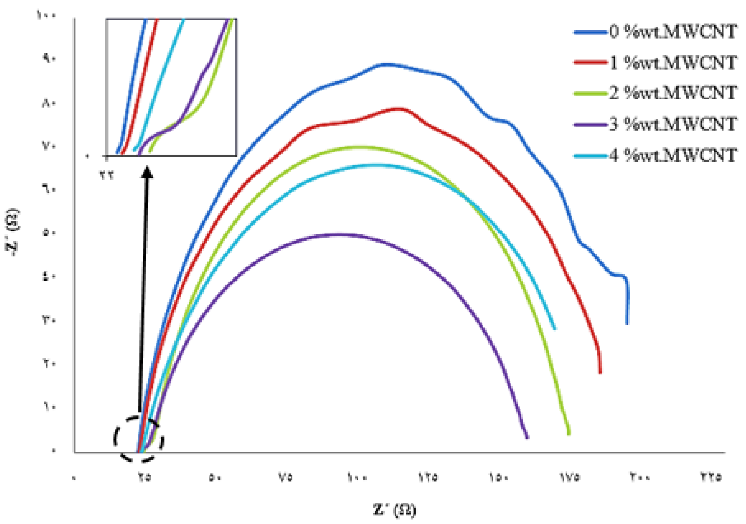
شکل (٤) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از مورفولوژی پوشش نانوکامپوزیتی $TiO_2$-4%wt.MWCNT را نشان می‌دهد. در این تصویر، خوشه‌های متشکل از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیم که شکلی تقریبا کروی و اندازه‌ای در حدود ٤٥ نانومتر دارند و نانولوله‌های کربنی مشاهده می‌شوند. از این تصویر مشخص می شود که نانولوله‌های کربنی به طور یکنواخت در بین نانوذرات دی‌اکسید تیتانیم پراکنده شده‌اند و تماس مطلوبی بین آن‌ها وجود دارد. ساختار متخلخل پوشش در نتیجه خروج حلال در مرحله آنیل شکل گرفته است. ضخامت میانگین پوشش‌ها ۷ میکرومتر می‌باشد.

شکل (۵) منحنی‌های نایکوئیست سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته‌شده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چندديواره را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقایسه با سلول ساخته‌شده از پوشش دی‌اکسید تیتانیم خالص، مقاومت انتقال بار در فصل مشترک الکترولیت/ رنگ‌دانه/ دی‌اکسید تیتانیم در سلول‌های حاوی نانولوله کربنی کم شده است. علت این امر آن است که ساختار تک‌بعدی نانولوله کربنی به انتقال الکترون‌های تولیدشده در اثر تابش نور کمک می‌کند و باعث کاهش ترکیب مجدد حامل‌های بار می‌شود [2]. افزایش رسانایی پوشش نیز دلیل دیگری برای این مشاهده است [11,17].

سلول خورشیدی ساخته‌شده از پوشش $TiO_2$-3%wt.MWCNT دارای کم‌ترین مقاومت انتقال بار و در نتیجه بیش‌ترین سرعت انتقال الکترون می‌باشد. دیده می‌شود که افزایش بیش‌تر نانولوله کربنی باعث افزایش مقاومت فصل مشترک شده است. حضور بیش از حد نانولوله کربنی رقابتی در به دام‌اندازی نور بین این ماده و مولکول رنگ‌دانه ایجاد می‌کند [2,23]. همچنین، در این حالت مقدار رنگ‌دانه جذب‌شده در اثر افزایش ترک در پوشش (شکل ۳) کم می‌شود. در نتیجه این دو اتفاق، تزریق الکترون به فتوالکترود نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره کم و مقاومت زیاد می‌شود.



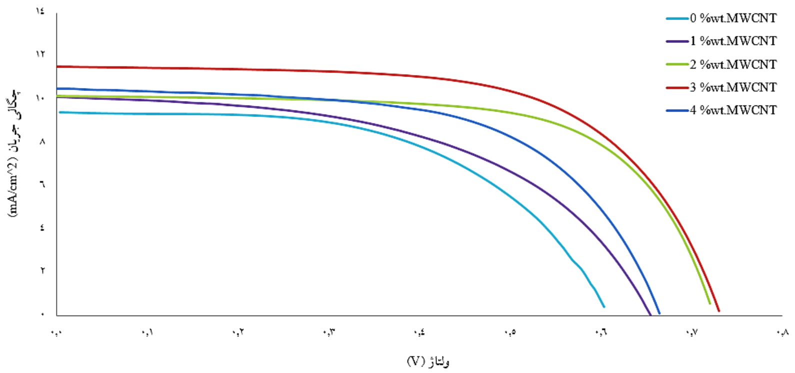

شکل ٤ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از مورفولوژی پوشش نانوکامپوزیتی $TiO_2$-4%wt.MWCNT




شکل ۵ منحنی‌های نایکوئیست سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته‌شده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چندديواره

شکل (٦) منحنی‌های چگالی جریان- ولتاژ سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته‌شده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چندديواره را نشان می‌دهد. پارامترهای فتوالکتروشیمیایی سلول‌های خورشیدی در جدول (١) به صورت خلاصه آورده شده‌اند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود عملکرد فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته‌شده از لایه‌های نازک نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره به مقدار نانولوله کربنی استفاده‌شده در ساخت سل وابسته است. با ازدیاد مقدار نانولوله کربنی چندديواره، مقادیر ولتاژ مدار باز ($V_{OC}$) ابتدا افزایش و سپس افت پیدا می‌کند. دلیل این مطلب آن است که مشارکت نانولوله‌های کربنی به مقدار کم در لایه دی‌اکسید تیتانیم می‌تواند نرخ ترکیب مجدد حامل‌های بار و مقاومت را کاهش دهد [2]. ضمن این که گزارش شده است که عملیات سطحی معمولا مقادیر $V_{OC}$ را صرف‌نظر از طبیعت و مشخصه‌های ماده پوشش‌داده‌شده روی الکترود افزایش می‌دهد [1,11]. ایجاد اتصال کوتاه بین FTO و الکترولیت از طریق نانولوله کربنی چندديواره نیز می‌تواند دلیلی برای کاهش $V_{OC}$ در مقادیر بیش از حد نانولوله کربنی چندديواره باشد [24]. ضمن آن که افزایش نانولوله کربنی چندديواره باعث جابجایی سطح فرمی ظاهری کامپوزیت به پتانسیل‌های مثبت‌تر و در نتیجه کاهش $V_{OC}$ می‌شود [25]. در مورد چگالی جریان مدار کوتاه ($J_{SC}$) نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود. دلایل بهبود $J_{SC}$ در مقادیر کم نانولوله کربنی چندديواره، افزایش جمع‌آوری و انتقال الکترون، توسعه اتصال داخلی بین ذرات دی‌اکسید تیتانیم و دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره در لایه متخلخل و ارتقای رسانایی الکتریکی هستند [1-4,24]. با وجود این، مقادیر بیش از حد نانولوله کربنی چندديواره با کاهش مکان‌های جذب رنگ‌دانه در اثر ایجاد ترک روی سطح الکترود (شکل ٣) و افزایش بازگشت الکترون به الکترولیت در اثر حضور نانولوله‌های کربنی در سطح الکترود و تماسشان با الکترولیت [24]، $J_{SC}$ را کم می‌کند. افزایش کلی در مقادیر فاکتور پرکنندگی (Fill Factor, FF) به دلیل کاهش مقاومت سری در فصل مشترک الکترولیت/ رنگ‌دانه/ نانوذره در اثر بهبود رسانایی الکتریکی الکترود دی‌اکسید تیتانیم است [11].




شکل ٦ منحنی‌های چگالی جریان– ولتاژ سلول‌های خورشیدی رنگ‌دانه‌ای ساخته‌شده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چندديواره

جدول ۱ پارامترهای فتوالکتروشیمیایی سلول‌های خورشیدی ساخته‌شده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی دی‌اکسید تیتانیم- نانولوله کربنی چندديواره حاوی درصدهای گوناگون از نانولوله کربنی چندديواره

| مقدار نانولوله کربنی چندديواره | $V_{OC}$ (V) | $J_{SC}$ (mA/cm$^2$) | FF | η(%) |
|---|---|---|---|---|
| 0%wt.MWCNT | ۰/٦۰ | ۹/٤۳ | ۰/٥٥ | ۳/۱٥ |
| 1%wt.MWCNT | ۰/٦٦ | ۱۰/۱۲ | ۰/٥۲ | ۳/٤۲ |
| 2%wt.MWCNT | ۰/۷۲ | ۱۰/۱٥ | ۰/٦۷ | ٤/۸۹ |
| 3%wt.MWCNT | ۰/۷۳ | ۱۱/٥۱ | ۰/٦۳ | ٥/۳۱ |
| 4%wt.MWCNT | ۰/٦٦ | ۱۰/٥۰ | ۰/٦۰ | ٤/۱٦ |

## نتیجه‌گیری

شرایط بهینه در ساخت سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای عبارت است از به کارگیری مقدار سه درصد وزنی نانولوله کربنی در ساخت سل. تحت این شرایط، بازدهی تبدیل انرژی ٥/۳۱٪ حاصل می‌شود و میزان افزایش بازدهی نسبت به حالتی که از لایه دی‌اکسید تیتانیم خالص در ساخت فتوآند استفاده شود، ٦۹٪ است. این ارتقا در بازدهی تبدیل توان به کاهش ترکیب مجدد الکترون‌ها و الکترون‌حفره‌ها، کاهش مقاومت انتقال بار در فصل مشترک دی‌اکسید تیتانیم/ رنگ‌دانه/ الکترولیت، افزایش مساحت سطح الکترود کاری و انتقال موثر الکترون توسط نانولوله‌های کربنی که ارسال الکترون از لایه دی‌اکسید تیتانیم متخلخل به زیرلایه اکسید قلع دوپ‌شده با فلوئور را بهبود می‌بخشند، نسبت داده شد.

از طرف دیگر، افزایش بیش از حد مقدار نانولوله‌های کربنی باعث آگلومره‌شدن آن‌ها، ایجاد رقابت در به دام- اندازی نور بین رنگ‌دانه و نانولوله‌های کربنی و کاهش شفافیت الکترود کاری، افزایش مقاومت انتقال بار در فصل مشترک دی‌اکسید تیتانیم/ رنگ‌دانه/ الکترولیت و توده‌شدن ذرات دی‌اکسید تیتانیم و کاهش مقدار رنگ‌دانه جذب‌شده و در نتیجه افت بازدهی تبدیل فتوالکتریک سلول خورشیدی رنگ‌دانه‌ای می‌شود.

## قدردانی

از صندوق حمایت از پژوهشگران کشور، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو و معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف به سبب حمایت‌هایشان از فعالیت‌های پژوهشی قدردانی می‌شود.

## مراجع


1. Lee T.Y., Alegaonkar P.S., Yoo J.B., "Fabrication of dye-sensitized solar cell using $TiO_2$-coated carbon nanotubes", *Thin Solid Films*, Vol. 515, No. 12, pp. 5131-5135, (2007).
2. Yu J., Fan J., Cheng B., "Dye-sensitized solar cells based on anatase $TiO_2$ hollow spheres/carbon nanotube composite films", *Journal of Power Sources,* Vol. 196, No. 18, pp. 7891–7898, (2011).
3. Chaveanghong S., Smith S.M., Sudchanham J., Amornsakchai T., "Enhancement of power conversion efficiency of dye-sensitized solar cells by using multi-walled carbon nanotubes/$TiO_2$ electrode", *Journal of the Microscopy Society of Thailand,* Vol. 4, No. 1, pp. 36-40, (2011).
4. Chang H., Hsieh T.J., Chen T.L., Huang K.D., Jwo C.S., Chien S. H., "Dye-sensitized solar cells made with $TiO_2$-coated multi-wall carbon nanotubes and natural dyes extracted from Ipomoea", *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 12, pp. 2879-2884, (2009).
5. Tan B., Wu Y., "Dye-sensitized solar cells based on anatase $TiO_2$ nanoparticle/nanowire composites", *The Journal of Physical Chemistry B,* Vol. 110, No. 32, pp. 15932-15938, (2006).
6. Nazeeruddin M.K., Kay A., Rodicio I., Humphry-Baker R., Müller E., Liska P., Vlachopoulos N., Grätzel M., "Conversion of light to electricity by cis-$X_2$bis (2, 2'-bipyridyl-4, 4'-dicarboxylate) ruthenium (II) charge-transfer sensitizers (X= $Cl^-$, $Br^-$, $I^-$, $CN^-$, and $SCN^-$) on nanocrystalline $TiO_2$ electrodes", *Journal of the American Chemical Society,* Vol. 115, No. 14, pp. 6382-6390, (1993).
7. Shi D., Guo Z., Bedford N., "Nanomaterials and devices", Elsevier Inc., Beijing: Tsinghua University Press, pp. 161–174, (2015).
8. Zhao L., Yu J., Fan J., Zhai P., Wang S., "Dye-sensitized solar cells based on ordered titanate nanotube films fabricated by electrophoretic deposition method", *Electrochemistry Communications*, Vol. 11, No. 10, pp. 2052-2055, (2009).
9. Kongkanand A., Martínez Domínguez R., Kamat P.V., "Single-wall carbon nanotube scaffolds for photoelectrochemical solar cells. Capture and transport of photogenerated electrons", *Nano Letters*, Vol. 7, No. 3, pp. 676-680, (2007).
10. Trancik J.E., Barton S.C., Hone J., "Transparent and catalytic carbon nanotube films", *Nano Letters*, Vol. 8, No. 4, pp. 982-987, (2008).
11. Lee K.M., Hu C.W., Chen H.W., Ho K.C., "Incorporating carbon nanotube in a low temperature fabrication process for dye-sensitized $TiO_2$ solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 92, No. 12, pp. 1628-1633, (2008).
12. Umeyama T., Imahori H., "Carbon nanotube-modified electrodes for solar energy conversion", *Energy & Environmental Science,* Vol. 1, No. 1, pp. 120-133, (2008).
13. Kim S.L., Jang S.R., Vittal R., Lee J., Kim K.J., "Rutile $TiO_2$-modified multi-wall carbon nanotubes in $TiO_2$ film electrodes for dye-sensitized solar cells", *Journal of Applied Electrochemistry,* Vol. 36, No.

12, pp. 1433-1439, (2006).

14. Yen C.Y., Lin Y.F., Liao S.H., Weng C.C., Huang C.C., Hsiao Y.H., Ma C.C.M., Chang M.C., Shao H., Tsai M.C., Hsieh C.K., "Preparation and properties of a carbon nanotube-based nanocomposite photoanode for dye-sensitized solar cells", *Nanotechnology*, Vol. 19, No. 37, pp. 375305, (2008).
15. Jang S.R., Vittal R., Kim K.J., "Incorporation of functionalized single-wall carbon nanotubes in dye-sensitized $TiO_2$ solar cells", *Langmuir*, Vol. 20, No. 22, pp. 9807-9810, (2004).
16. Fan B., Mei X., Sun K., Ouyang J., "Conducting polymer/carbon nanotube composite as counter electrode of dye-sensitized solar cells", *Applied Physics Letters*, Vol. 93, No. 14, pp. 143103, (2008).
17. Lin W.J., Hsu C.T., Tsai Y.C., "Dye-sensitized solar cells based on multi-walled carbon nanotube–titania/titania bilayer structure photoelectrode", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 358, No. 2, pp. 562–566, (2011).
18. Yu H., Quan X., Chen S., Zhao H., "$TiO_2$-multiwalled carbon nanotube heterojunction arrays and their charge separation capability", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 111, No. 35, pp. 12987-12991, (2007).

۱۹. بخشایش ا. م.، "سلول خورشیدی فعال شده با رنگ حاوی نانوذره و نانوسیم دی‌اکسید تیتانیم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۹۱).

20. Carp O., Huisman C.L., Reller A., "Photoinduced reactivity of titanium dioxide", *Progress in Solid State Chemistry*, Vol. 32, No. 1, pp. 33-177, (2004).
21. Jitianu A., Cacciaguerra T., Benoit R., Delpeux S., Beguin F., Bonnamy S., "Synthesis and characterization of carbon nanotubes–$TiO_2$ nanocomposites", *Carbon*, Vol. 42, No. 5, pp. 1147-1151, (2004).
22. Birkholz M., "Thin film analysis by X-ray scattering", John Wiley & Sons, Weinheim, pp. 122-129, (2006).
23. Morales E.R., Mathews N.R., Reyes-Coronado D., Magaña C.R., Acosta D.R., Alonso-Nunez G., Martinez O.S., Mathew X., "Physical properties of the CNT:$TiO_2$ thin films prepared by sol–gel dip coating", *Solar Energy*, Vol. 86, No. 4, pp. 1037-1044, (2012).
24. Nishikiori H., Ohta T., Uesugi Y., Itai H., Endo M., Fujii T., "Influence of adding carbon nanotubes on photoelectric conversion properties of dye-doped titania gel", *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 38, No. 8, pp. 1857-1869, (2012).
25. Peining Z., Nair A.S., Shengyuan Y., Shengjie P., Elumalai N.K., Ramakrishna S., "Rice grain-shaped $TiO_2$–CNT composite-A functional material with a novel morphology for dye-sensitized solar cells", *Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 231, No. 1, pp. 9-18, (2012).